

薛海, 潘从辉, 池映华, 等. 保水堰体型参数对过流能力影响的数值模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 1021-1029.
XUE H, PAN C H, CHI Y H, et al. Numerical simulation of the influence of water keeping weir body type parameter on flow capacity[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 1021-1029. (in Chinese)

保水堰体型参数对过流能力影响的数值模拟

薛海, 潘从辉, 池映华, 刘培

(华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046)

摘要: 保水堰是一种新型溢流堰结构形式, 为提升保水堰在大型调水工程中的输水能力, 利用实测数据进行模型验证, 在确保模拟保水堰堰内水流流态规律准确性的前提下, 探究工程中保水堰体型参数对输水系统过流能力的影响。研究揭示了堰井段环状旋涡区的产生与发展机理, 并对 11 种降低堰高方案进行数值计算, 分析堰井段流速矢量分布和环状旋涡区范围及能量耗散的变化, 发现使输水系统过流能力增加的最佳堰高区间为 $[1.0 P_1 \geq P \geq 0.7 P_1]$ (P 为保水堰堰高; P_1 为堰前堰高)。当堰高在此区间内, 通过降低 P 使堰前流速矢量仰角和堰后环状旋涡区变小, 能量耗散显著降低, 降低 $0.1 P_1$, 流量平均增加 2.1%。考虑到工程改造成本和过流能力提升效果, 故在本研究提出最佳堰高区间内修改保水堰的结构, 为输水系统过流能力提升提供参考。

关键词: 保水堰; 数值模拟; 过流能力提升; 环状旋涡区

中图分类号: TV672 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0098

近年来, 随着水利工程建设的快速发展, 对长距离分区段低压输水^[1]的研究不断深入, 保水堰^[2]作为衔接水工建筑物, 中间是挡水堰, 两端为有压管道, 其优点是输水管线压力小且水力控制简单。许国峰等^[3]、万五一等^[4]、刘昉等^[5]对保水堰局部损失系数、流量系数、流态等水力特性进行研究, 戴熙武等^[6]研究了增加明槽段对堰室水体进气和水流流态影响, 郭兰波等^[7]、李琳等^[8]、杨开林等^[9]利用模型试验和数值模拟对保水堰交替水流及水力瞬变进行了研究, 得出了针对水体流动规律的相关计算公式, 他们从以上不同角度揭示了保水堰水力特性的变化规律。然而, 当前关于保水堰的研究大多是基于原有结构, 分析水位差^[10-11]、糙率^[12]等因素对过流能力的影响。仅有少数学者^[13-15]对保水堰体型进行优化设计, 梳理不良流态, 消除不稳定水力现象, 使保水堰体型更加符合水流运行条件, 从而提升保水堰过流能力。综合上述, 由于保水堰复杂流态造成输水工程未达到最优输水状态, 因此研究保水堰体型参数对输水能力的影响是目前大型输水工程迫切需要的。

本文通过现场调研, 采用数值模拟方法, 对堰井段高速水流区和环状旋涡区等多种水力要素进行研究; 找出环状旋涡区的成因, 提出降堰方案, 梳理保水堰流态; 通过对方案的数值仿真计算, 得到使保水堰过流流量增加的最佳堰高区间, 为保水堰一箱涵输水系统过流能力的提升提供理论依据和数据支撑。

1 模型的建立

1.1 基本方程

数值模型计算^[16-18]将水流视为不可压缩黏性流体的运动, 利用有限体积结构网格法求解三维 Navier-Stokes(N-S)方程, 包括连续性方程、动量方程。考虑到保水堰内流线弯曲程度大, 湍流模型选取 RNG k- ϵ 模型^[19], 利用 VOF^[20](Volume of Fluid)方法, 通过结构网格单元中流体体积和网格体积比的函数来追踪每个单元内流体变化, 并确定自由液面。

连续性方程。连续方程的表达式为

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的流速分量; A_x 、

收稿日期: 2023-05-30 修回日期: 2023-09-27 网络出版时间: 2023-10-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231018.0928.001>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930643)

作者简介: 薛海(1974—), 男, 河南郑州人, 副教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学等方面研究。E-mail: xuehai@ncwu.edu.cn

通信作者: 潘从辉(1997—), 男, 山东临沂人, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: 776211603@qq.com

A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上可流动的面积分数。

动量方程。动量方程的表达式为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

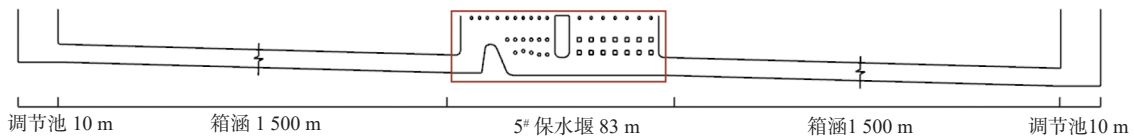
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

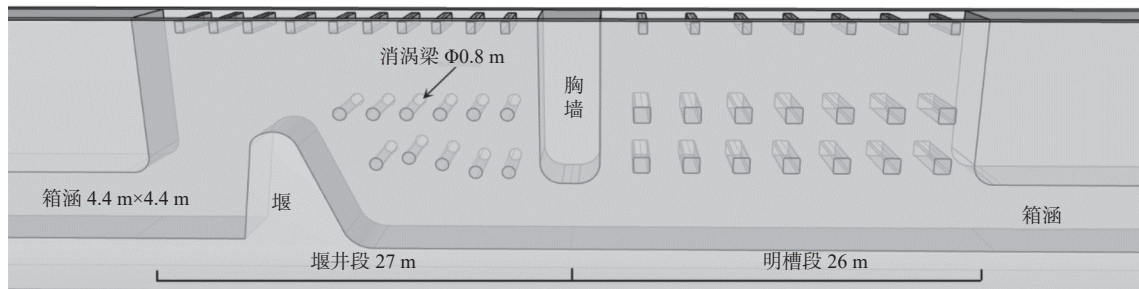
式中： G_x 、 G_y 、 G_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的重力加速度， m/s^2 ； f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的黏滞力； V_F 为可流动的体积分数； ρ 为流体密度， kg/m^3 ； p 为作用在流体微元上的压力。

1.2 几何模型的建立及网格划分

研究所使用的保水堰—箱涵输水系统按单孔布置，各结构具体尺寸：上下游调节池段长 10 m、上下游箱涵段长 1 500 m、保水堰段长 83 m、宽 4.4 m，其中，堰井段设置 11 根消涡梁，明槽段设置 14 根消涡梁，模拟总范围 3 103 m，模型见图 1。



(a) 保水堰-箱涵系统侧视图



(b) 保水堰局部三维几何模型图

图 1 保水堰-箱涵系统几何模型

Fig. 1 Geometric modeling diagram of water keeping weir box culvert system

为使计算网格更好地反映模型轮廓曲线变化处的特征，以及堰井段环状旋涡的形成、流速矢量的分布，需要对网格进行局部加密，网格尺寸由 0.5 m

加密到 0.25 m，模拟区域共划分网格总数超过 1.11×10^6 个，加密区网格总数超过 1.03×10^5 个，具体网格划分见图 2。

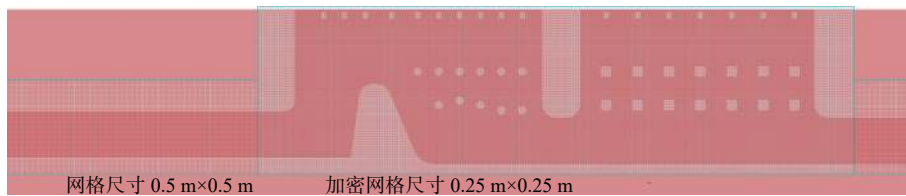


图 2 保水堰处模型网格划分

Fig. 2 Schematic diagram of model grid division at water keeping weir

1.3 边界条件

边界条件划分：上下游调节池设定为压力边界；保水堰及箱涵底部和边壁设定为不可流通的墙体边界；顶部设置为大气压力边界。为减轻计算压力，与实测情况吻合，根据实测水位设置充满箱涵及保水堰的初始水位；流体性质为 20 ℃ 单相不可压缩液体。考虑到最小网格尺寸及流速大小，选取计算

时间步长为 0.001 s。

1.4 网格无关性及模型率定

为保证本研究所选模型的准确性，选择大型调水工程中的保水堰作为研究对象，通过流量等实测数据进行模型率定，具体工况设定见表 1。

模拟区域分为箱涵段和保水堰段，采用六面体结构网格进行分块划分，以箱涵断面平均流量为依

据,找出最适合的网格尺寸及组合。当网格尺寸为0.5 m时,平均流量相对误差在2.4%,对保水堰段加密后,相对误差进一步下降至1.1%,具体的网格尺寸选用见表2。

表1 工况设定
Tab. 1 Test conditions

工况	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	上游水池水位/m	下游水池水位/m
验证工况 1	57	12.23	11.69
2	40.89	12.10	11.70
模拟工况 3	48.42	12.15	11.85
4	64.11	12.30	11.60

以现场实测数据率定数值模拟计算结果,其中试验工况中实测与模拟箱涵断面平均流量、流速对

比相对误差均在1.5%以内,测压管水头值基本吻合,相对误差均在0.6%以内,确保了模拟计算结果的准确性。实测与模拟测验管水头对比见图3。

表2 网格无关性验证

Tab. 2 Grid independence verification table

网格尺寸/m	流量			流速		
	断面平均/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)	实测/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)	相对误差/ %	断面平均/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	实测/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
0.8	55.62	57	2.4	0.96	0.99	3.3
0.5	55.95	57	1.8	0.96	0.99	2.9
0.5 局部加密0.25	56.40	57	1.1	0.97	0.99	1.5
0.3 局部加密0.15	56.40	57	1.1	0.97	0.99	1.5

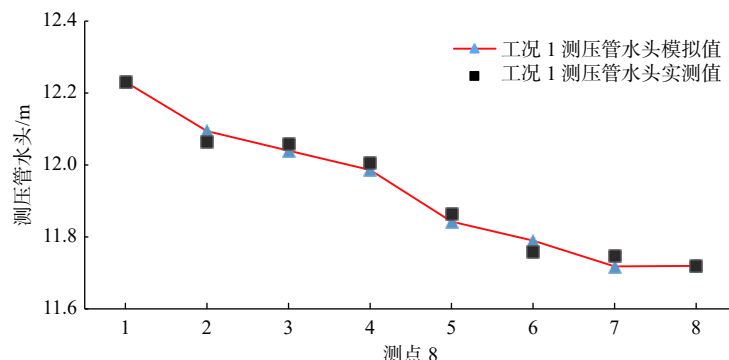
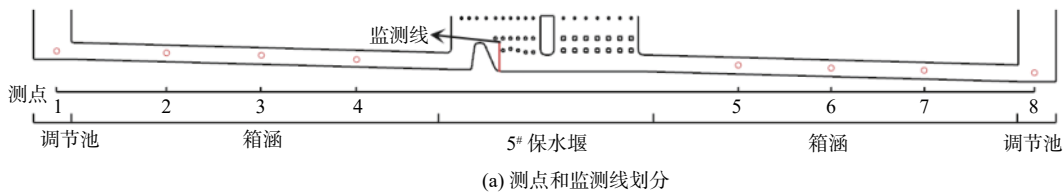


图3 测压管水头验证

Fig. 3 Verification diagram of piezometer head

2 环状旋涡区成因分析及消减对策

2.1 环状旋涡区成因分析

分析保水堰堰高变化对堰井段水流流态的影响,其中明槽段作用是减少下游箱涵进气,使箱涵内流速分布均匀^[6],它不会影响堰井段水流流态分布,因此研究以保水堰堰井段为主。如图4所示,在原堰高下,工况1和工况2的流线分布和环状旋涡区范围基本一致,堰井段最大流速均在堰上分别为1.30 m/s和1.89 m/s。对于堰后旋涡区,由于保水堰的阻挡作用使堰后存在低流速区域,过堰较高流速的水流在绕过保水堰的流动过程中能够在较长的流程中保持高度一致的运动方向,该高流速区与其上的低流速区具有明显的分界线,在该分界线上存在显著的流

速梯度,高速水流通过流层之间的内摩擦力不断带动低流速区水流运动,进而在堰前形成逆时针的环状旋涡区和在堰后形成明显的顺时针环状旋涡区(如图中黑框所示)。考虑到保水堰的高度是抑制保水堰-箱涵输水系统过流能力的主要因素,因此降低保水堰高度,缩小环状旋涡区的范围以减少堰井段能量耗散,从而达到提高输水系统过流能力的目的。

2.2 降低保水堰堰高方案

根据上述对于堰井段环状旋涡区的形成机理分析,为了提升保水堰过流能力,拟对保水堰进行改造^[21-23]。建立不同堰高 P 模拟工况进行数值模仿真计算,具体保水堰布置形式见图5。 P_1 为堰前堰高, P_2 为堰后堰高, h 为堰后水深。

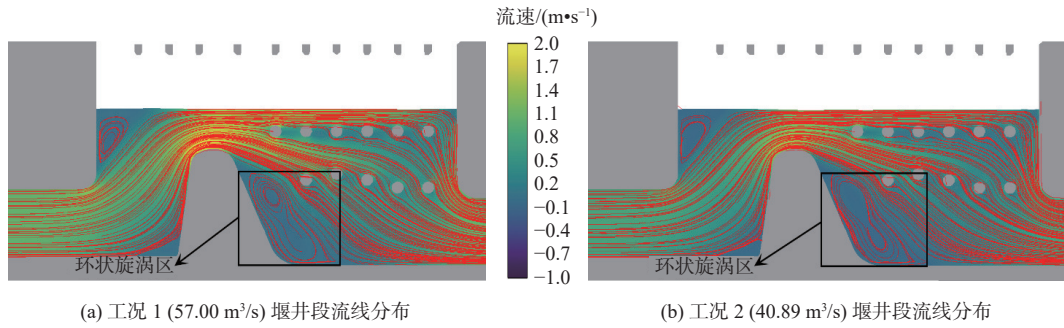


图 4 不同工况下保水堰堰后环状旋涡区

Fig. 4 Diagram of annular vortex zone behind water keeping weir under different working conditions

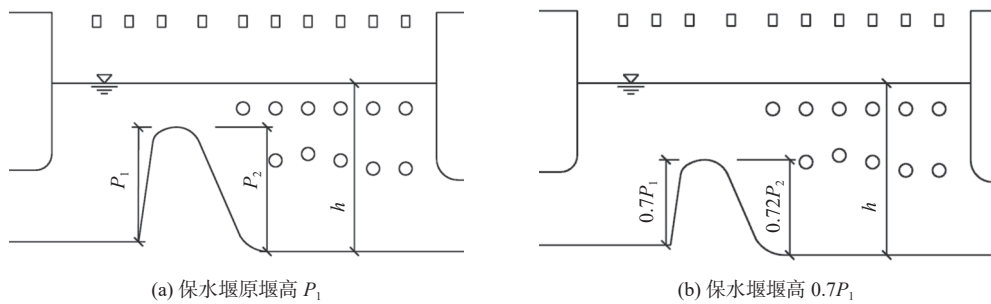


图 5 降低保水堰堰高方案

Fig. 5 Schematic diagram of reducing the height of water keeping weir

3 数值模拟

3.1 工况选取

保水堰中 P 的高度是影响堰井段流量分配流态分布重要因素, 方案设定根据文献 [24-25] 取 11 种堰高进行对比试验, 分析 P 对堰井段水流流态的影响, 堰高降低幅度为 $0.1P_1$, 保水堰的堰型按照初设时的标准进行设计。选用试验工况对应的上下游调节池水位作为模型的边界条件, 由于相同堰高方案下堰井段高速主流区和环状旋涡区大小范围以及流量增幅规律相似, 故以工况 1 为主展开分析。

3.2 堰井段流速矢量分布

不同 P 下保水堰堰井段的流速大小及矢量图见图 6, 其中紫框与黄框所示为堰前及堰后环状旋涡区。当 P 在 $0.7P_1 \sim 1.0P_1$ 时, 具有较高流速的水流进入堰室后在绕保水堰的流动过程中, 产生高速流动区域, 从各图横向对比中可以看出, 高速流动区域随着 P 的变化呈现以下的规律性: 当 P 在 $0.7P_1 \sim 1.0P_1$ 时, 高速水流由箱涵进入堰室, 由于保水堰的阻挡, 堰前流速矢量产生仰角最大为 50° , 此时降低 P 对高速水流挤压作用减弱; 对 P 在 $0 \sim 0.7P_1$ 的情形, 当 $P=0.6P_1$ 时, 堰顶高程与箱涵的上壁高程和胸墙下沿高程齐平, 随着 P 的降低, 从箱涵通过

的高速水流流速矢量仰角为 30° , P 对高速水流的影响减弱, 高速水流主要从胸墙下沿通过。

当 P 在 $0 \sim 1.0P_1$ 时, 堰前环状涡区呈现如下规律性: 在高堰情况下, 堰前流速矢量具有较大仰角, 对所形成的环状旋涡区具有较强的挤压作用, 使其局限在较小范围, 但随着 P 的降低, 堰前流速矢量仰角随之变小, 环状旋涡区有了较大扩展空间, 因此其尺度也逐渐扩大至主流区外的所有区域; 在堰后环状涡区, 随着保水堰的降低导致高速流动区域流速矢量仰角变小进一步压缩低流速区域, 使堰后旋涡区逐渐缩小, 直至 $P=0$ 时, 从箱涵流出的高速水流集中通过胸墙下沿直接流向下流, 这时堰后环状旋涡区消失。

3.3 堰井段堰后流速

为研究环状旋涡区的流速分布情况, 绘制流速监测线见图 3(a), 由于堰井段存在消涡梁会对堰后流速分布产生影响, 因此只研究底板为起点 8 m 范围内的垂线流速分布。

如图 7 所示, 当 P 为 $0 \sim 1.0P_1$ 时, 由于保水堰后有顺时针方向环状旋涡区的存在, 靠近堰室底板处流速矢量与主流速矢量方向相反。环状旋涡区的流速分布特点: 旋转中心流速为 0, 最大的负流速发生在底部为 -0.38 m/s , 这使堰井段的能量耗散增大,

但随着 P 的降低,环状旋涡区范围缩小,旋转中心下移;而高速主流区流速在 $0.8\sim 1.2\text{ m/s}$,中心高度随着 P 的减小而降低,这时水流以较小的仰角流向下游。当 $P=0$ 时,在测点 $1\sim 4\text{ m}$ 范围内高速主流区流

速相对一致,分布在 0.9 m/s 左右,不再存在负向流速,这时水流以较快流速流向下游,达到箱涵—保水堰的最大过流能力。

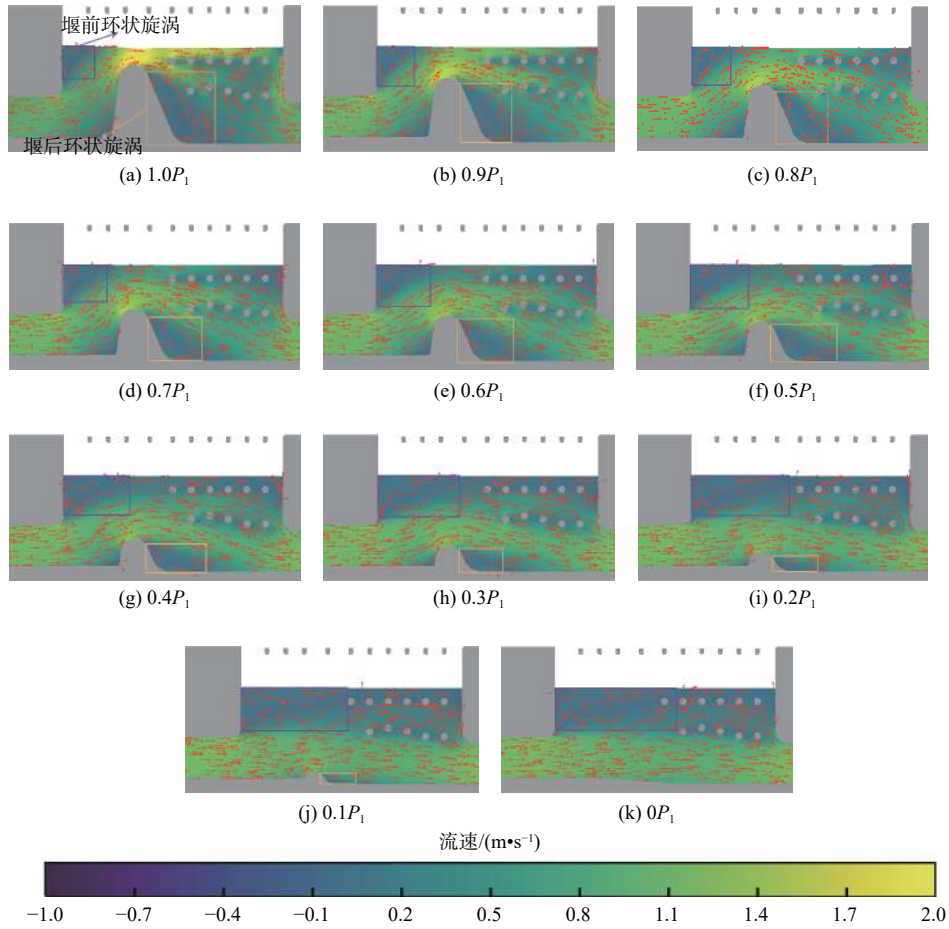


图 6 工况 1 降堰方案后不同堰高流速分布

Fig. 6 Distribution of flow velocity at different weir heights after lowering weir scheme in condition 1

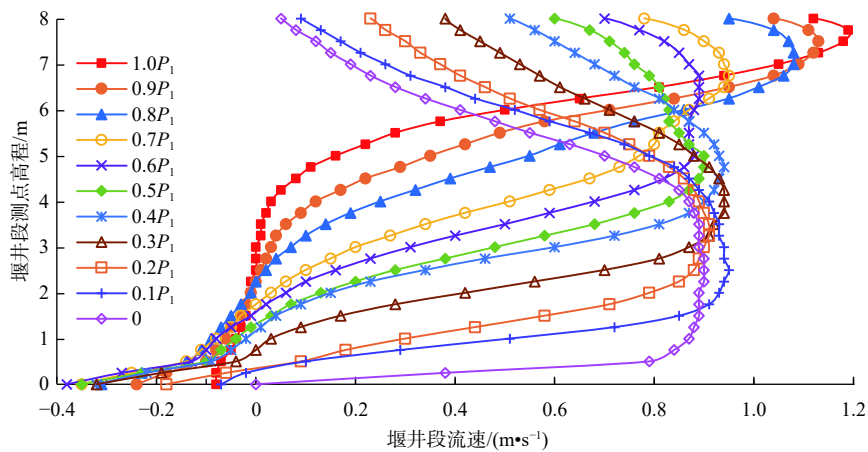


图 7 工况 1 降堰方案后堰后垂流流速分布

Fig. 7 Vertical velocity distribution behind the weir after lowering weir scheme in condition 1

3.4 堰井段能量耗散

堰室内湍动能能量耗散的主要区域是堰井段胸

墙前沿、堰前和堰后环状旋涡区,见图 8。当 P 在 $0.7P_1\sim 1.0P_1$ 时,胸墙前沿占据堰井段能量耗散的主

导地位,降低 $0.1P_1$ 能量耗散峰值衰减达 8.9×10^{-3} $J/(kg \cdot s^{-1})$; 当 P 在 $0 \sim 0.7P_1$ 时,这时胸墙前沿、堰前

和堰后环状旋涡区三者共同消耗水流能量,三者此消彼长影响着保水堰的过流能力。

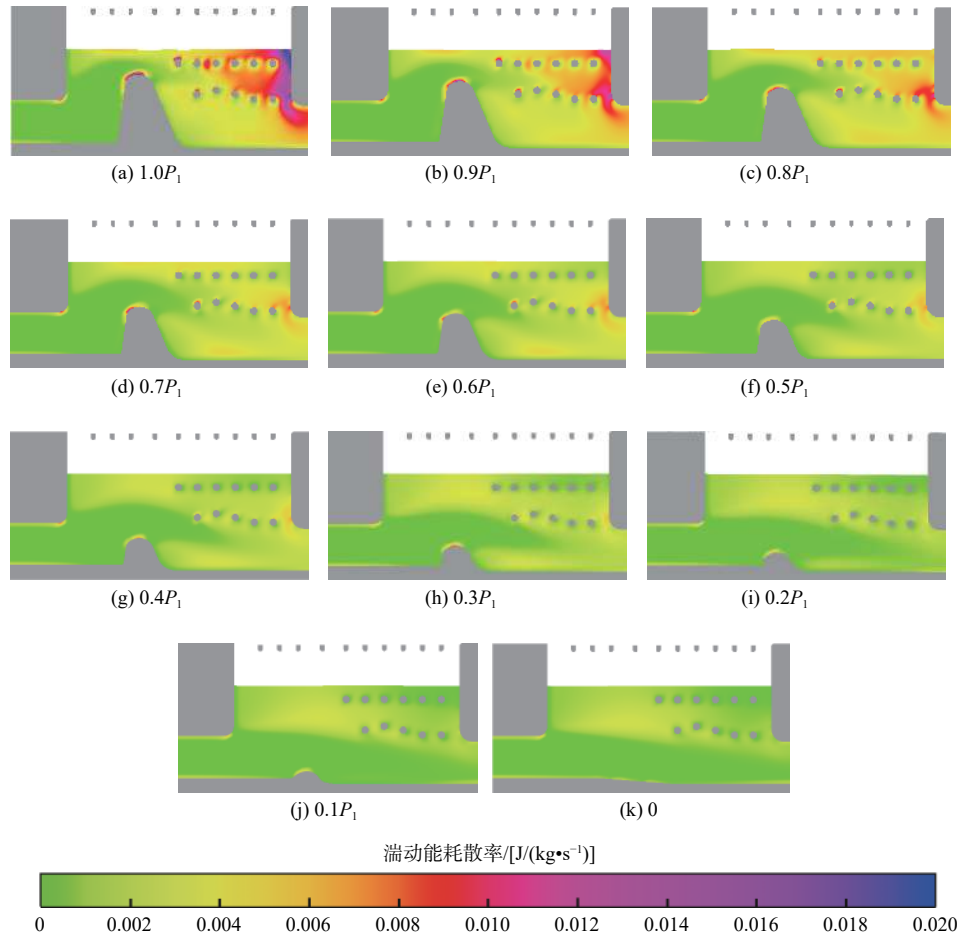


图 8 工况 1 降堰方案后不同堰高湍动能耗散率分布

Fig. 8 Distribution of turbulent energy dissipation rates at different weir heights after lowering weir scheme under condition 1

环状旋涡区的长轴范围及堰前流速矢量的变化关系见图 9。从图 8 和图 9 可知: 当 P 在 $0.7P_1 \sim 1.0P_1$ 时, 保水堰胸墙前沿是能量耗散的主要区域, 随着堰的降低, 堰前的流速矢量夹角降低, 高速水流靠近胸墙下沿, 压缩堰后环状旋涡区, 堰井段能

量耗散减少, 保水堰的过流流量快速增加; 当 P 在 $0 \sim 0.7P_1$ 时, 这时堰井段胸墙前沿不再占据能量耗散的主导地位, 由于堰前环状旋涡区的迅速增大, 这一区域能量耗散增加, 消耗了部分水流能量, 保水堰的过流流量增幅速度减缓。

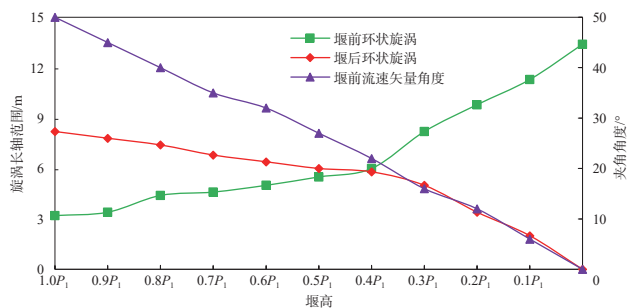


图 9 工况 1 降堰后环状旋涡区与流速矢量夹角关系

Fig. 9 Relationship between the annular vortex zone and the velocity vector angle after lowering the weir under condition 1

3.5 堰井段流量提升

4 种工况下不同降堰方案与过流流量之间的关

系见图 10。由图 10 可以看出, 各工况下流量增幅规律基本相同, 由许国峰^[25]等给出的保水堰相对水

深 h/P_2 与局部损失系数 ζ 的关系,并结合图 6 和图 8 得知:当 P 在 $0.7P_1 \sim 1.0P_1$ 时,由保水堰对于水流的阻碍作用较大,水流发生旋滚和碰撞,流态不稳定,能量耗散剧烈,保水堰局部损失系数变化明显,此时降低 $0.1P_1$,各工况下流量平均增加 2.1%;当 P 在 $0 \sim 0.7P_1$ 时,堰已经淹没在一定的水深之下,形成相对稳定的井流,此时保水堰对水流相当于一个阻力坎的作用,减小 P 对保水堰的损失系数影响逐渐趋于恒定,此时降低 $0.1P_1$,各工况下流量平均增加 0.5%。

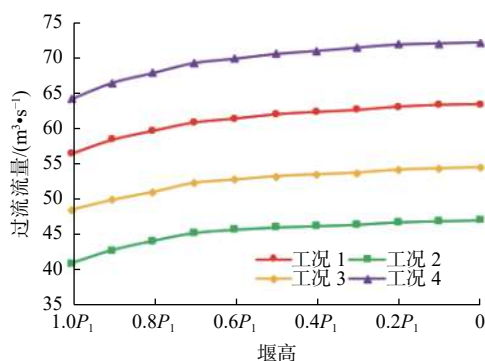


图 10 4 种工况下不同降堰方案与保水堰过流流量的关系

Fig. 10 Relationship between different weir lowering schemes and water keeping weir overflow flow under 4 working conditions

4 结论

本文针对保水堰复杂流态,利用数值计算探究降低堰高对堰井段水流流态的影响机理,并以此为依据提出最佳堰高区间,研究不同流量下降堰方案对堰井段水流流态影响,结果相对一致,并对不同堰高进行了对比。主要结论如下:

工况 1 和工况 2 原堰高下,成功模拟典型保水堰高速水流区和环状旋涡区的分布,确定保水堰堰高是高速水流区的分散和环状旋涡区的根源,因此降低保水堰高度,缩小环状旋涡区的范围、集中高速主流区以减少堰井段能量耗散,从而提高输水系统过流能力。

对于多种不同的堰高方案进行数值计算,研究得到 $[1.0P_1 \geq P \geq 0.7P_1]$ 最佳堰高区间。在此区间内,堰前流速矢量仰角和堰后环状旋涡区范围减小,保水堰局部损失系数变化明显,能量耗散显著降低,导致降低 $0.1P_1$ 流量平均增加 2.1%,流量增幅效果显著。

通过对保水堰不同堰高方案的对比,考虑到保水堰的高度整体改造成本和过流能力提升效果,当

P 降至 $0.7P_1$ 时,输水系统平均过流流量提升可达 6.3%。降堰改造方案可为提升箱涵—保水堰系统过流能力提供有力的依据。

参考文献:

- [1] 练继建,郑政,李琳,等. 多孔并联分段低压输水系统的水力特性和控制[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 950-957. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2006.08.009.
- [2] 万五一. 长距离输水系统的非恒定流特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. DOI: 10.7666/d.y707610.
- [3] 许国锋,刘树玉,杨敏. 南水北调工程保水堰水力特性研究及体型优化[J]. 人民长江, 2007(9): 43-45, 47. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2007.09.023.
- [4] 万五一. 长输水管道尾部保水堰的水力特性试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006(9): 1530-1533. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2006.09.010.
- [5] 刘昉,吴敏睿,周世佳. 凌庄子水厂保水堰流量系数试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 352-357. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0037.
- [6] 戴熙武,盛雨. 保水堰后增加明槽段对水体进气及水流流态的影响[J]. 中国农村水利水电, 2017(5): 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2017.05.017.
- [7] 郭兰波,蔡付林,花玉龙. 保水堰堰井淹没出流时水体固有频率计算公式[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 104-107.
- [8] 李琳,穆祥鹏,练继建. 保水堰交替水流数值模拟研究[J]. 水利水电技术, 2007(3): 36-39.
- [9] 杨开林,吴换营,蒋云怒. 设置保水堰管涵输水系统的水力瞬变数值仿真[J]. 水利学报, 2007(3): 306-311. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.03.009.
- [10] 王凯,郭彬. 保水堰过流能力的试验研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(9): 1026-1028. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2010.09.028.
- [11] 谭义海. 真空有压管道过流能力及压降研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 153-156. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.11.034.
- [12] 李传夫,董丹丹,何利华. 设有保水堰的有压输水箱涵超设计过流能力研究[J]. 水利水电工程设计, 2021, 40(2): 50-52. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6980.2021.02.018.
- [13] 杨敏,范静,许国峰. 保水堰局部体型优化的数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2008(2): 81-83, 87.
- [14] 杨敏,许国锋,彭新民,等. 保水堰水力特性研究[C]//

- 全国水利学与水利信息学学术大会. 2005. DOI: [ConferenceArticle/5aa3b66bc095d72220bac0c8](#).
- [15] 祁媛媛, 李国栋, 李珊珊, 等. 琴键堰过流水力特性数值模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 164-169, 175. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180025](#).
- [16] 蒋卫威, 鱼京善, 陈寅生, 等. 基于FLOW3D的梅溪洪涝段桥梁雍水三维数值模拟[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 776-785. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0081](#).
- [17] 施伟, 成立. 水源地取水泵站水流流态数值模拟与改善[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 159-176. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0039](#).
- [18] 查智力, 刘超, 严天序, 等. 井筒式泵装置水力特性数值模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 189-195. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0058](#).
- [19] MOHAMMADI-AHMAR A, BAZDIDI-TEHRANI F, SOLATI A, et al. Flow and contaminant dispersion analysis around a model building using non-linear eddy viscosity model and large eddy simulation: Prediction of contaminant dispersion by large eddy simulation and non-linear eddy viscosity model[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, 14: 957-972. DOI: [10.1007/s13762-016-1204-z](#).
- [20] PUCKETT E G, ALMGREN A S, BELL J B, et al. A high-order projection method for tracking fluid interfaces in variable density incompressible flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 130(2): 269-282. DOI: [10.1006/jcph.1996.5590](#).
- [21] GHADERI A, DANESHFARAZ R, DASINEH M, et al. Energy dissipation and hydraulics of flow over trapezoidal-triangular labyrinth weirs[J]. *Water*, 2020, 12(7): 1992. DOI: [10.3390/w12071992](#).
- [22] GHADERI A, ABBASI S. Experimental and numerical study of the effects of geometric appendage elements on energy dissipation over stepped spillway[J]. *Water*, 2021, 13(7): 957. DOI: [10.3390/w13070957](#).
- [23] GHADERI A, DANESHFARAZ R, ABBASI S, et al. Numerical analysis of the hydraulic characteristics of modified labyrinth weirs[J]. *International Journal of Energy and Water Resources*, 2020, 4: 425-436. DOI: [10.1007/s42108-020-00082-5](#).
- [24] 杨敏, 艾海峰, 陈为博. 保水堰局部水头损失系数的数值模拟[J]. *水利水电技术*, 2005(7): 46-48. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0860.2005.07.013](#).
- [25] 许国锋. 保水堰水力特性及体型优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. DOI: [10.7666/d.y1046406](#).

Numerical simulation of the influence of water keeping weir body type parameter on flow capacity

XUE Hai, PAN Conghui, CHI Yinghua, LIU Pei


(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Water keeping weir is a new type of overflow weir, characterized by small pressure in two sections of the transmission line, and simple hydraulic control. In order to enhance the water conveyance capacity of water keeping weir in large water diversion projects. First of all, based on the actual operation of the project, the RNG $k-\varepsilon$ turbulent flow model is used to close the control equations and establish a three-dimensional isometric numerical simulation model of the water keeping weir, and the simulated head and flow velocity of the pressure measuring tube are in good agreement with the measured data, and on the premise of ensuring the accuracy of the flow pattern in the simulated water keeping weir, the influence of the water keeping weir body parameters on the over-flow capacity of the box culvert - water keeping weir water conveyance system is investigated. It revealed the mechanism of the generation and development of annular vortex zones in the weir section, and determined that the dispersion of high velocity water flow zone caused by the height of the water keeping weir and the presence of annular vortex zones are the main bottlenecks affecting the improvement of flow capacity. Thus, the proposed solution of reducing the height of the water keeping weir concentrate the high velocity water flow zone and reduce the scope of the annular vortex zone to reduce the energy dissipation in the weir section, so as to achieve the purpose of improving the overflow capacity of the water conveyance system.

Numerical calculations were carried out for 11 options of reducing the weir height of water keeping weirs, and

the flow velocity vector distribution and the extent of the annular vortex zone in the weir section as well as the variation of turbulent kinetic energy dissipation and overflow flow were analyzed. The results show that the overflow of the water conveyance system can be enhanced by the weir reduction scheme, and by compared between different weir height schemes, the optimal weir height interval that increases its overflow capacity is finally found to be $[1.0 P_1 \geq P \geq 0.7 P_1]$ (where P is water keeping weir height). When the weir height is within this range, the compression effect on the high velocity flow area is weakened by lowering P , resulting in smaller flow vector elevation angle in front of the weir and the annular vortex zone behind the weir, and significantly lower energy dissipation, lowering $0.1 P_1$ flow rate increases by 2.1% on average, where the weir height P is lowered to $0.7 P_1$, when the flow rate is increased up to 6.3%, which can basically meet the water demand requirements of the project; Outside this interval, although lowering P reduces the annular vortex zone after the weir and the flow velocity vector angle becomes smaller, the energy dissipation is reduced, but the rapid expansion of the annular vortex zone before the weir consumes part of the water flow energy, resulting in the flow lift decay, at this time, lowering $0.1 P_1$ flow rate only increases by 0.5% on average. In consideration of the project modification cost and the effect of overflow capacity enhancement, the structure of the water keeping weir is modified in the optimal weir height interval proposed to provide reference for the overflow capacity enhancement of the water transmission system.

Key words: water keeping weir; numerical simulation; improvement of flow capacity; annular vortex zone



健全节水制度政策 强化水资源刚性约束